

ارائه یک راهبرد برای تکرار ترازیبی دقیق در مقیاس محلی با هدف تعیین زمین‌ساخت و ژئودینامیک ارتفاعی در ایران

مسعود مهدی حسینی^۱، یحیی جمور^۲، یعقوب حاتم چوری^۳، پیترو نیچک^۴، حمید نظری^۵، معصومه آمیغ پی^۶ و سیاوش عربی^۶

^۱استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲دانشیار، آموزشکده نقشه‌برداری، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران

^۳دکتری، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران

^۴استاد، گروه مهندسی نقشه‌برداری و ژئودزی، دانشگاه نیو برانزویک، نیو برانزویک، کانادا

^۵استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۶دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۷کارشناس ارشد، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۲۶

چکیده

از آنجا که انجام مشاهدات ترازیبی دقیق به عنوان با ارزش‌ترین منبع اطلاعات در زمینه تغییر شکل ارتفاعی پوسته زمین فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است، برای استفاده مؤثر از آن در بررسی ژئودینامیک ارتفاعی، برنامه‌ریزی بایستی با دقت و به صورت کنجکاوانه صورت گیرد. به عبارت دیگر در طراحی و انجام مشاهدات باید ویژگی‌های تغییر شکل ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه را مد نظر داشت، به‌ویژه اگر منطقه مورد مطالعه وسیع و تغییر شکل در آن کم و بسیار ناهمگون باشد. هدف اصلی این پژوهش مطالعه ویژگی‌های تغییر شکل ارتفاعی در ایران برای اندازه‌گیری‌های ترازیبی دقیق است. نتایج حاصل از این بررسی کمک می‌کند تا اندازه‌گیری‌های ترازیبی دقیق در مناطقی متمرکز شوند که بیشتر در معرض تغییر شکل ارتفاعی بوده است و یا آگاهی و بررسی تغییر شکل ارتفاعی در این مناطق اولویت دارد. برای این منظور، داده‌های مختلف زمین‌شناختی، ژئوفیزیکی، لرزه‌نگاری، ژئودزی و توزیع جمعیتی کشور در کنار هم قرار گرفته و ارزیابی شده‌اند. نتیجه این ارزیابی پیشنهاد یک راهبرد جدید برای ترازیبی دقیق در کشور است که در قالب یک طرح پژوهشی با حمایت سازمان نقشه‌برداری کشور و به منظور انجام مطالعات ژئودینامیک ارتفاعی تهیه شده است.

کلیدواژه‌ها: ترازیبی دقیق، تغییر شکل ارتفاعی، تغییر شکل ناهمگون، شبکه ترازیبی دقیق سراسری ایران

E-mail: djamour@ncc.org.ir

*نویسنده مسئول: یحیی جمور

۱- مقدمه

یکی پس از دوره یخبندان نمونه‌ای از تغییرات مکانی پیوسته و فرونشست تدریجی سطح زمین بر اثر استخراج آب‌های زیرزمینی نمونه‌ای از تغییرات ارتفاعی پوسته زمین است که نسبت به زمان به طور پیوسته به وقوع می‌پیوندد. افزون بر این، لغزش و حرکت آرام دو صفحه زمین‌ساختی مجاور نسبت به هم، نمونه‌ای از تغییرات ارتفاعی گسسته پوسته زمین نسبت به مکان و حرکات ارتفاعی سطح زمین به هنگام وقوع زلزله نمونه‌ای از تغییرات ارتفاعی گسسته پوسته زمین نسبت به زمان هستند. از سوی دیگر، در بررسی‌های علمی مختلف حرکات ارتفاعی سطح زمین به حرکات خطی نسبت به زمان (همانند پایین رفتن بستر اقیانوس‌ها، دریاها و رودخانه‌ها به دلیل بارهای رسوبی) و حرکات غیرخطی و یا شتاب‌دار (همانند تغییرات ارتفاعی پیش از وقوع زلزله به‌عنوان پیش‌نشانگرهای آن) تفکیک می‌شوند (Vanicek & Krakiwsky, 1986). داده‌های مختلف مورد استفاده در ژئودزی برای تعیین حرکات ارتفاعی ماهیت متفاوتی دارند. این اطلاعات می‌تواند به صورت گسسته یا پیوسته نسبت به زمان، مطلق یا نسبی، و متعلق به یک نقطه یا یک خط یا یک سطح گردآوری شوند. همچنین داده‌های بیان شده که طیف متنوعی از دقت‌ها دارند، می‌توانند به طور خاص برای هدف آشکارسازی و تعیین مقادیر حرکات ارتفاعی فراهم و یا برای مجموعه‌ای از اهداف تهیه شوند (Vanicek & Krakiwsky, 1986).

انواع مشاهدات پایه مختلف که برای تعیین حرکات ارتفاعی مناسب هستند عبارتند از: ۱- تکرارهای موقعیت ارتفاعی (ترازیابی دقیق، GPS، تصاویر راداری) ۲- تغییرات سطح آب دریا ۳- تغییرات شیب زمین (Tilt) ۴- تغییرات نقل (Vanicek & Krakiwsky, 1986).

بدیهی است که برای انجام یک مطالعه جامع به منظور مدل‌سازی تغییرات ارتفاعی، با توجه به ماهیت تغییرات ارتفاعی موجود در یک منطقه، باید نقش و سهم

بی‌شک از نظر فعالیت‌های ژئودینامیکی و سوانح طبیعی مانند زلزله، رانش زمین، سیل، فرونشست، خشکسالی و تلفات انسانی و خسارات تأسیساتی و ساختمانی ناشی از آنها، ایران یکی از مخاطره‌آمیزترین کشورهای دنیا است. خسارات جانی و مالی بالا در زمین‌لرزه‌هایی مانند بم و رودبار گواه این ادعا است (Motagh et al., 2006; Choy & Zednik, 1997). این در حالی است که زمین‌لرزه‌های مشابه یا بزرگ‌تر در کشورهای توسعه یافته دنیا خسارات جانی و مالی خیلی کمتری دارند. در بررسی رویکرد و سابقه فعالیت چنین کشورهایی در شاخه‌های مختلف علوم زمین و به‌ویژه در ژئودزی، بهینه‌سازی روش‌های اندازه‌گیری به وسیله بازنگری مؤثر در دستورالعمل‌های موجود و یا مکانیزه کردن روش‌های سنتی با هدف افزایش بازدهی، تنها نمونه‌هایی از تفاوت‌های بسیار موجود بین این کشورها و ایران است. ترازیبی دقیق در ابعاد محدود، دقیق‌ترین ابزار موجود در بررسی تغییرات نسبی ارتفاعی پوسته زمین به‌شمار می‌آید. از این رو استفاده مؤثر از این ابزار می‌تواند اطلاعات با ارزشی را در مورد وضعیت ژئودینامیک ارتفاعی کشور در اختیار بگذارد. به دلایل مختلف، راهبرد کنونی مورد استفاده در سازمان نقشه‌برداری، استفاده از این ابزار ارزشمند را در مطالعات ژئودینامیک ارتفاعی در کشور با مشکلاتی مواجه می‌سازد. هدف اصلی از این پژوهش، پیشنهاد یک راهبرد جدید برای بهینه‌سازی نحوه گردآوری مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق برای مقاصد ژئودینامیک ارتفاعی در ایران است.

۲- انواع تغییرات ارتفاعی

تغییرات ارتفاعی پوسته زمین به طور مکانی و یا زمانی می‌تواند پیوسته یا ناپیوسته باشند. بالا آمدن سطح زمین در بخش وسیعی از کره زمین به دلیل ذوب توده‌های

موسوم به شبکه ترازیابی درجه یک کشور، در امتداد راه‌های اصلی در سرتاسر کشور احداث شده و شامل ۹۸ لوپ با متوسط طول محیط برای هر لوپ ۳۱۵ کیلومتر و دارای طول کل حدود ۳۱۰۰۰ کیلومتر است (عربی و همکاران، ۱۳۸۵).

راهبرد کنونی در تکرار مشاهدات ترازیابی دقیق در ایران که طی ده سال اخیر دنبال می‌شود، شامل تکرار مشاهدات کل شبکه ترازیابی درجه یک کشور است. در حال حاضر حدود ۲۵۰۰۰ کیلومتر از این شبکه برای بار دوم اندازه‌گیری شده است. آرایش مسیرهای این شبکه در سطح ایران در شکل ۱ و به رنگ سرخ نمایش داده شده است. توجه نکردن به ماهیت و سنخیت تغییرات ارتفاعی و ویژگی‌های مهم آن در ایران، مانند محدوده‌های با تغییر شکل بزرگ، آهنگ تغییر ارتفاعی، منشأ تغییرات و میزان اهمیت این تغییرات با توجه به معیارهایی مانند تراکم جمعیت و وجود سازه‌های حساس، از اشکالات اصلی وارد بر راهبرد کنونی است.

از آنجا که اساساً در طراحی و احداث شبکه درجه یک مناطق دارای تغییرات ارتفاعی مورد نظر نبوده‌اند، پراکندگی کنونی مسیرهای ترازیابی دقیق در این شبکه به گونه‌ای است که ترکیبی از مناطق دارای تغییرات ارتفاعی و بدون این تغییرات را پوشش می‌دهند. بدیهی است که تکرار مشاهدات ترازیابی با هزینه‌های نسبتاً قابل توجه در مناطق بدون تغییرات ارتفاعی امری غیرمنطقی و غیر علمی است. از طرف دیگر، برای تکرار اندازه‌گیری‌ها در مناطقی که دارای تغییرات ارتفاعی هستند، باید نسبتی منطقی بین فاصله زمانی بین مشاهدات دو وهله، میزان تغییرات ارتفاعی، دقت مشاهدات ترازیابی دقیق و نیز اهمیت و اولویت مناطق مورد اندازه‌گیری وجود داشته باشد. به این ترتیب اختلاف بین مشاهدات دو وهله زمانی به صورت معنی‌داری آشکارکننده تغییرات ارتفاعی واقعی و دائمی پوسته زمین خواهد بود. با بررسی این تغییرات می‌توان نتایج مطلوبی را برای استفاده‌های مختلف مهیا کرد.

۵- پیشنهاد یک راهبرد جدید برای تکرارهای ترازیابی دقیق و معرفی معیارها

از راه مشاهدات ترازیابی دقیق، تنها می‌توان به اختلاف ارتفاع دست یافت. همچنین با تکرار مشاهدات ترازیابی دقیق، تنها می‌توان به اختلاف ارتفاع رسید. تقریباً همیشه، کمیت اختلاف ارتفاع (تغییرات ارتفاعی یک نقطه نسبت به نقطه مجاور یا نسبت به یک نقطه مقایسه) متغیری مناسب و مورد نیاز در مطالعات ژئودینامیک است. این نکته کلیدی تأکید می‌کند که در مطالعات ژئودینامیک ارتفاعی با استفاده از مشاهدات تکراری ترازیابی دقیق، نیازی به پیوستگی مکانی این مشاهدات نیست. به عبارت دیگر، هر قطعه ۳-۲ کیلومتری از مشاهدات تکراری ترازیابی دقیق بین دو پنج‌مارک یکسان در دو وهله زمانی، که یک تغییر اختلاف ارتفاع را به دست می‌دهد، کمیتی مناسب برای بررسی و مدل‌سازی تغییرات ارتفاعی پوسته زمین است. بنابراین به کمک مشاهدات منفصل و پراکنده، به صورت اختلاف ارتفاع‌های تکرار شده بین پنج‌مارک‌های مجاور و نه تکرار پیوسته مسیرهای طولانی ترازیابی دقیق با مسافت چند صد یا گاه چند هزار کیلومتر می‌توان مطالعات ژئودینامیک ارتفاعی را با موفقیت دنبال کرد.

بنابراین، بی‌شک ادامه راهبرد کنونی در تکرار مشاهدات کند و پرهزینه ترازیابی دقیق در سراسر کشور به صورت یکپارچه و نه گسسته یا منفصل در هر دو دسته از مناطق با تغییر شکل ارتفاعی و مناطق عاری از آن چیزی جز اتلاف هزینه و زمان نیست. در حالی که با گردآوری نشانه‌ها و شواهد مناسبی از شاخه‌های مختلف علوم زمین مانند زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، لرزه‌نگاری و ژئودزی می‌توان به شناسایی حوزه‌های محلی با تغییر شکل ارتفاعی قابل توجهی پرداخت و با تمرکز اندازه‌گیری‌ها در این مناطق و انجام کنجکاوانه مشاهدات، به برآوردی دقیق از فواصل زمانی و توزیع مکانی مناسب برای انجام تکرارهای این مشاهدات رسید. نشانه‌ها و شواهد یادشده مؤلفه‌ها و عناصر راهبرد پیشنهادی در این پژوهش را تشکیل می‌دهند.

هریک از این مشاهدات پایه به درستی تعیین و در روند گردآوری مشاهدات در نظر گرفته شود. این مقاله تنها به یکی از مهم‌ترین این مشاهدات یعنی تکرارهای ترازیابی دقیق می‌پردازد.

۳- تکرارهای ترازیابی دقیق در کشورهای دیگر

در کشورهای مختلف، مشاهدات تکراری ترازیابی دقیق به منظور مدل‌سازی تغییرات ارتفاعی سطح زمین و بر اساس شناخت اولیه از ویژگی‌های اصلی تغییرات ارتفاعی موجود، منشأ و اهمیت این تغییرات دنبال می‌شود. در کشور فرانسه، با مساحتی کمتر از یک سوم مساحت ایران، مشاهدات ترازیابی دقیق پیشینه‌ای در حدود ۲۰۰ سال دارد. در این کشور بیش از ۳۰۰ هزار کیلومتر ترازیابی دقیق برای مقاصد ایستاد (تعیین موقعیت ارتفاعی) انجام شده است. با این توجه که در این کشور تغییرات ارتفاعی وجود ندارد، اندازه‌گیری‌های تکراری ترازیابی دقیق اصلاً انجام نشده‌اند (Kasser, 2008; IGN, 1987). در کشور آمریکا تکرارهای ترازیابی دقیق به صورت کاملاً محلی و گسسته صورت می‌گیرند. به عبارت دیگر این اندازه‌گیری‌ها تنها در مناطقی که شواهدی از تغییر شکل ارتفاعی در آنها وجود دارد، انجام می‌شوند. در این ارتباط می‌توان به عنوان مثال به مدل‌سازی چهاربعدی مربوط به حرکات ارتفاعی اخیر در ناحیه بالآآمدگی کالیفرنیا جنوبی با منشأ فعالیت‌های گسل San Andreas اشاره کرد (Vanicek et al., 1978). در کشور کانادا نیز مانند آمریکا تکرارهای ترازیابی دقیق به صورت محلی و گسسته انجام می‌شوند. نخستین نقشه حرکات ارتفاعی در این کشور از روی ۵۰۴۶ قطعه منفصل و پراکنده از مشاهدات تکراری ترازیابی دقیق و داده‌های جزرومدی تهیه شده است (Vanicek & Nagy, 1980). در کشور هندوستان با مساحتی دو برابر مساحت ایران و با ۱۳۵ سال سابقه در ترازیابی دقیق، تنها طی سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۹، ۴۹۰۰ کیلومتر مشاهدات تکراری ترازیابی دقیق برای مقاصد ژئودینامیک و مطالعات زلزله در ۱۳ پروژه محلی و به طور منفصل از هم انجام گرفته است. بیش از ۳۴۰۰ کیلومتر از این مشاهدات (حدود ۷۰ درصد از آن) به صورت یک‌طرفه انجام شده است (Gupta et al., 2003). در کشور ژاپن، با مساحتی چهار و نیم برابر کوچک‌تر از ایران، حدود ۲۰۰۰ کیلومتر در سال اندازه‌گیری‌های تکراری ترازیابی دقیق به صورت محلی و گسسته، فقط روی بخشی از پنج‌مارک‌های درجه یک و در مناطقی که تغییرات ارتفاعی وجود دارد با هدف ژئودینامیک و پیش‌بینی زلزله انجام می‌شوند (Government of Japan, 2004). کشور فنلاند تحت تأثیر بالآآمدگی ناشی از ذوب بارهای یخی پس از دوره یخبندان قرار داشته و در نتیجه با تغییر شکل‌های ارتفاعی قابل ملاحظه‌ای در سراسر آن مواجه است. مقادیر بالآآمدگی از ۲ تا ۸ میلی‌متر در سال برای مناطق مختلف این کشور گزارش شده است (Makinen & Saaranen, 1999). به همین دلیل در فنلاند تکرارهای ترازیابی دقیق به صورت سراسری صورت می‌پذیرد. مشاهدات پیوسته شبکه ترازیابی دقیق فنلاند مشتمل بر ۱۷ لوپ به طول حدود ۴۹۰۰ کیلومتر است. در سه دور متوالی تکرار مشاهدات ترازیابی دقیق در این کشور، ۹ لوپ با طول مسیر ۳۶۰۰ کیلومتر از ۴۹۰۰ کیلومتر دارای سابقه اندازه‌گیری هستند. فاصله زمانی بین هر دو اندازه‌گیری متوالی این شبکه بیش از ۴۰ سال (با آپک‌های مرکزی ۱۹۰۲، ۱۹۴۶، ۱۹۸۶) است.

۴- تکرارهای ترازیابی دقیق در ایران

هدف اصلی از ایجاد شبکه درجه یک ترازیابی دقیق و انجام نخستین مرحله از مشاهدات ترازیابی دقیق بر روی آن، دست یافتن به یک تراکم مناسب از نقاط کنترل ارتفاعی دقیق (با ارتفاع اتومتریک) در سرتاسر کشور بوده است. پیوستگی مکانی مشاهدات مرحله اول و اتصال آنها به ایستگاه جزرومدی مرجع از ضروریات اجتناب‌ناپذیر برای مشاهدات این مرحله به شمار می‌آید. شبکه ملی ترازیابی دقیق

۵-۱. نشانه اول: ویژگی‌های مکانی و هندسی گسل‌های فعال

به طور روشن یکی از شواهد مهم علمی که نشانگر تغییرات ارتفاعی است، وجود گسل‌های فعال است. بنابراین، دانستن ویژگی‌های مکانی و هندسی گسل‌های فعال، گامی اساسی در راستای مشخص کردن محدوده‌های با تغییرات ارتفاعی احتمالی است. اگر چه به لحاظ نظری، گسل‌ها به گسل‌های با تغییرات افقی (راستالغز) و گسل‌های با تغییرات ارتفاعی (عادی و وارون) تقسیم می‌شوند، اما معمولاً گسل‌های فعال هر دو نوع تغییر ارتفاعی و افقی را دارند. در بررسی تغییر شکل‌های ارتفاعی، گسل‌های با تغییرات ارتفاعی بزرگ‌تر اهمیت بالاتری دارند. شکل ۲ آرایش گسل‌های فعال در ایران را نمایش می‌دهد. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های نسبت داده شده به این گسل‌ها در این شکل (حسامی، ۱۳۸۲)، ماهیت ترکیبی رفتار گسل‌های فعال را در ایران تأیید می‌کند.

۵-۲. نشانه دوم: موقعیت مکانی و هندسی زمین‌لرزه‌های بزرگ در

سده بیستم میلادی

از آنجا که زمین‌لرزه‌ها عمدتاً ناشی از فعالیت گسل‌های فعال هستند، مطالعه آرایش مکانی و تراکم آنها در یک بازه زمانی نسبتاً طولانی، می‌تواند نشانگر وجود تغییرات ارتفاعی احتمالی در مناطق زلزله‌خیز باشد. این دومین شاهد علمی است که بر اساس آن می‌توان به اطلاعاتی از محدوده تغییرات ارتفاعی دست یافت. این تغییرات ارتفاعی به سه حالت مختلف به صورت حرکات پیش از زلزله، در هنگام وقوع زلزله و پس از زلزله دسته‌بندی می‌شوند. شکل ۳، آرایش زمین‌لرزه‌های (دستگاهی و غیردستگاهی) با بزرگای بیش از ۵ در مقیاس اندازه‌گیری ریشتر در ایران ظرف حدود یک قرن گذشته نشان می‌دهد (IIEES).

۵-۳. نشانه سوم: تغییرات انحنای پوسته زمین حاصل از مشاهدات ارتفاعی

موجود در ژئودزی

از تغییرات انحنا یا تغییرات اختلاف ارتفاع حاصل از مشاهدات وهله‌های زمانی مختلف موجود در ژئودزی (Altiner, 1999) می‌توان به عنوان شاهد علمی دیگری برای بررسی حضور تغییرات ارتفاعی در محلی خاص استفاده کرد و در مورد استمرار تکرار مشاهدات ترازیبی دقیق در آن محل تصمیم گرفت. بدیهی است وجود مقادیر تغییر انحنای بیشتر (و یا مقادیر تغییر اختلاف ارتفاع بزرگ‌تر) در یک منطقه نشانه ضرورت بیشتر انجام مشاهدات تکراری در آنجا است. در استفاده از این روش باید به محدودیت‌هایی مانند تراکم‌های نامناسب داده‌ها توجه کرد. شکی نیست که در شناسایی حوزه‌های محلی تغییر شکل نشانه‌های مختلف موجود به صورت ترکیبی مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرند. شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر تغییر انحنای (با دیمانسیون عکس فاصله) یا تغییر شکل ارتفاعی را در ایران بر اساس مشاهدات دو مرحله ترازیبی دقیق و مشاهدات ایستگاه‌های دائم GPS موسوم به شبکه ژئودینامیک سراسری (Djamour et al., 2007) نمایش می‌دهند.

۵-۴. نشانه چهارم: پهنه‌بندی خطر زلزله در ایران

بر اساس بررسی انجام شده توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، از نظر میزان خطر نسبی زلزله، ایران به چهار پهنه خیلی پر خطر، پر خطر، با خطر متوسط، و کم خطر تقسیم‌بندی می‌شود که به ترتیب با حروف A، B، C و D معرفی می‌شوند (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴). شکل ۶ این پهنه‌بندی را نمایش می‌دهد. بدیهی است که پهنه‌ها و محدوده‌های با خطر ریسک بیشتر زلزله، سهم بیشتری از مشاهدات تکرارهای ترازیبی دقیق را به خود اختصاص می‌دهند.

۵-۵. نشانه پنجم: تراکم نسبی جمعیت

به طور منطقی در انجام تکرارهای ترازیبی دقیق مناطق با تراکم جمعیت بیشتر نسبت به مناطق با تراکم جمعیت کمتر اولویت بیشتری دارند. بنابراین، میزان تراکم نسبی جمعیت در یک منطقه یکی از نشانه‌های مورد توجه در راهبرد پیشنهادی این پژوهش است. شکل ۷ میزان تراکم نسبی جمعیت در سراسر ایران را نمایش می‌دهد. با توجه

به این شکل پیداست که منطقه تهران و مناطق شمال، شمال باختری و باختر ایران با بیشترین تراکم جمعیت بالاترین اولویت را در تکرار مشاهدات ترازیبی دقیق دارند.

۵-۶. نشانه ششم: تغییر سطح آب‌های زیرزمینی (و منابع دیگر) و نتایج

InSAR

کاهش سطح آب‌های زیرزمینی که از راه استخراج و پمپاژ آب برای مصارف گوناگون از جمله کشاورزی و صنعتی صورت می‌گیرد، سبب تغییرات ارتفاعی و تغییرات ثقل روی سطح زمین به صورت فرونشست می‌شود. همچنین افزایش سطح آب‌های زیرزمینی با پر شدن سفره‌های زیرزمینی به وسیله باران، برف و ...، سبب تغییرات ارتفاعی و تغییرات ثقل روی سطح زمین می‌شود. این تغییرات ارتفاعی از راه‌های مختلف قابل اندازه‌گیری است. مفیدترین روش، استفاده از داده‌های تکراری ثقل (زمینی و ماهواره‌ای) است، که به مدلسازی میزان تغییرات آب‌های زیرزمینی منتهی می‌شود. فرونشست‌ها و بالاآمدگی‌های سطح زمین ناشی از تغییرات آب‌های زیرزمینی غالباً مقادیر بزرگی (در حد چند سانتی‌متر تا چند دسی‌متر در سال) دارند. در این حالت، مناسب‌ترین روش برای تعیین این تغییرات استفاده از روش InSAR است. در این روش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان تغییر شکل‌های ارتفاعی پدید آمده را با دقتی در حدود یک سانتی‌متر با پیوستگی مکانی بررسی کرد. وجود تعدادی نقاط کنترل ارتفاعی (GPS) یا ترازیبی با مشاهدات تکراری، به نتایج حاصل از InSAR اطمینان و کیفیت بیشتری می‌بخشد. شکل ۸ تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را در آبخوان ورامین در یک بازه زمانی چهارده ساله نمایش می‌دهد (وزارت نیرو). این اطلاعات به طور مستمر توسط وزارت نیرو و به وسیله چاه‌های پیزومتریک در مناطق مختلف کشور تهیه می‌شود. تغییرات ارتفاعی سطح زمین به صورت فرونشست در ورامین و تهران در شکل ۹ نمایش شده است (Motagh et al., 2008).

۵-۷. نشانه هفتم: شبکه ایستگاه‌های سنگی چند منظوره فیزیکال ژئودزی و

ژئودینامیک ایران

این شبکه شامل حدود ۷۰۰ ایستگاه سنگی با تراکم ۵۵ در ۵۵ کیلومتر است که سرتاسر ایران را پوشش می‌دهد (شکل ۱۰). تاکنون مشاهدات این شبکه (شامل مشاهدات ثقل، GPS و ترازیبی دقیق) تقریباً یک بار به طور کامل انجام شده است (Hatam et al., 2008). با تکرار مشاهدات این شبکه می‌توان به اطلاعات دقیق‌تری از ویژگی‌های تغییر شکل ارتفاعی در کشور رسید. در ادامه و بر اساس نشانه‌های پیشین می‌توان به طرح بهینه‌ای از تکرارهای ترازیبی دقیق در کشور رسید. تراکم مناسب نقاط اندازه‌گیری در این شبکه و تنوع مشاهدات با دقت بالا در آن و دقت در حدود یک سانتی‌متر برای اختلاف ارتفاع بین ایستگاه‌های مجاور و معادل آن برای ثقل، فرصت بسیار مناسبی را برای کشف و مدلسازی تغییر شکل‌های ارتفاعی فراهم می‌کند.

۶- بهینه‌سازی روش انجام تکرارهای ترازیبی دقیق برای اهداف

ژئودینامیک ارتفاعی: جایگزینی ترازیبی دقیق دوطرفه (رفت و برگشت) با ترازیبی دقیق یک‌طرفه (آلترناتیو)

با توجه به این که مشاهدات ترازیبی دقیق بسیار کند و با هزینه بالا گردآوری می‌شوند، به هر شکل منطقی که بتوان این روند را سرعت بخشید یک نکته مثبت و مهم به شمار می‌آید و می‌توان میزان بیشتری از کار ترازیبی دقیق را در شرایط یکسان به انجام رساند. متخصصان زیادی بر این باورند که میزان ترازیبی دقیق که هر ساله در ایران انجام می‌گیرد (حدود ۵۰۰۰ کیلومتر) نیازهای اساسی ژئودزی و ژئودینامیک ارتفاعی موجود در ایران را کفایت نمی‌کند. در حقیقت با توجه به پدیده‌های ژئودینامیکی بسیار و امکان تغییر شکل‌های پوسته زمین با منشأهای مختلف در ایران، انجام اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی بیشتر و به صورت مستمر در مقیاسه با

۷- نتیجه‌گیری

۷-۱. خلاصه‌ای از راهبرد پیشنهادی در ترازیبی دقیق

به طور روشن روند تغییرات ارتفاعی در ایران به صورت محلی، ناهمگون، چندگانه و غیریکپارچه است. بنابراین مشاهدات تکرارهای ترازیبی دقیق باید به صورت گسسته و محلی گردآوری شوند. مهم‌ترین عامل تغییرات ارتفاعی پوسته‌ای، جنبش گسل‌های فعال و پراکنده موجود در کشور است. بنابراین، تک تک این گسل‌ها باید به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گیرند و با انجام مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق تغییرات ارتفاعی در آنها مدل‌سازی شود تا در پایان با کنار هم گذاشتن این نتایج بتوان به مدلی جامع از تغییرات ارتفاعی در ایران رسید. فاصله زمانی تکرار مشاهدات هر گسل، محدوده فعالیت و تغییرات آن، اهمیت و میزان این حرکات و... باید به کمک داده‌ها و متخصصان زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و لرزه‌نگاری برآورد شود. در گام‌های بعدی با انجام کنجکاوانه مشاهدات می‌توان برآوردهای اولیه را تقویت کرد. برای تعیین فرونشست‌ها و تغییرات ارتفاعی بزرگ‌تر از یک سانتی‌متر، مناسب‌ترین روش استفاده از روش InSAR است. از سوی دیگر، برای تعیین تغییرات ارتفاعی دو ایستگاه نسبت به هم برای فاصله‌های بزرگ‌تر از ۵۰ کیلومتر، روش GPS دقیق‌تر و سریع‌تر و ارزان‌تر از ترازیبی دقیق است. خطاهای سیستماتیک بسیار، به‌ویژه در نواحی کوهستانی، سبب افت شدید کیفیت و دقت مشاهدات ترازیبی دقیق می‌شوند. مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق در سه وهله زمانی (۱۳۷۳، ۱۳۷۶ و ۱۳۸۰) در مسیر کرج- چالوس نشان می‌دهد که یک خطای سیستماتیک شدید به‌صورت ترند، دارای وابستگی شدید به توپوگرافی، به میزان ۱۵ میلی‌متر در سال طی فاصله‌ای در حدود ۸۰ کیلومتر در اختلاف مشاهدات دو وهله زمانی موجود است (Djamour, 2004).

۷-۲. پیشنهاد استقرار راهبرد پیشنهادی برای تکرارهای ترازیبی دقیق در البرز مرکزی (مطالعه موردی)

با در نظر گرفتن تمامی معیارهای معرفی شده در بخش ۵، کشف تغییرات ارتفاعی در محدوده البرز مرکزی، به دلیل اشراف این منطقه به شدت کوهستانی بر دو ناحیه پرجمعیت تهران و شمال کشور از دو سو، به طور آشکارا اهمیت فراوانی دارد. از این رو در نخستین گام برای استقرار راهبرد جدید، پیشنهاد می‌شود که این راهبرد در این منطقه عملیاتی شود. شکل ۱۱ موقعیت مکانی تمام گسل‌های اصلی شناخته شده دوره کواترنری در البرز مرکزی و ویژگی‌های مهم آنها را نمایش می‌دهد (Nazari & Ritz, 2005). مطالعه گسل‌ها با مدل توپوگرافی منطقه واقع بینانه‌تر است. شکل ۱۲ موقعیت مکانی گسل‌های فعال در البرز مرکزی را به همراه توپوگرافی نشان می‌دهد (Nazari & Ritz, 2008).

به عنوان مثال، گسل‌های پارچین، سامانه گسل شمال تهران، گسل میلاد (واقع در زیر برج میلاد)، و بخشی از گسل طالقان به روشنی دارای تغییرات ارتفاعی است و رفتارسنجی آنها برای شهر تهران اهمیت فراوانی دارد. تغییرات ارتفاعی گسل‌ها، بر اساس داده‌های زمین‌شناسی و در بازه‌های زمانی طولانی، غالباً کمتر از یک میلی‌متر در سال است. اما با توجه به این که این تغییرات ارتفاعی، به‌ویژه در زمان‌های نزدیک به رخداد زلزله، می‌تواند شتاب‌دار باشد، تکرارهای ترازیبی دقیق می‌تواند یک تصویر واقع بینانه‌تر از این برآورد را در اختیار گذارد.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از سازمان نقشه‌برداری کشور به دلیل حمایت مالی از این پژوهش و کلیه افرادی که به نوعی نقشی در انجام این پژوهش داشته‌اند سپاسگزاری می‌کنند.

مناطق دیگر دنیا امری اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به تجارب کشورهای دیگر، مانند آمریکا و هندوستان و مطالعات انجام شده در این پژوهش می‌توان از ترازیبی دقیق یک‌طرفه (با در نظر گرفتن زمینه‌سازی‌های خاص) به جای ترازیبی دقیق دو طرفه (رفت و برگشت) برای انجام تکرارهای ترازیبی دقیق به منظور مطالعات ژئودینامیک ارتفاعی سود جست و بدین وسیله راندمان کار صحرائی را تا میزان زیادی افزایش داد.

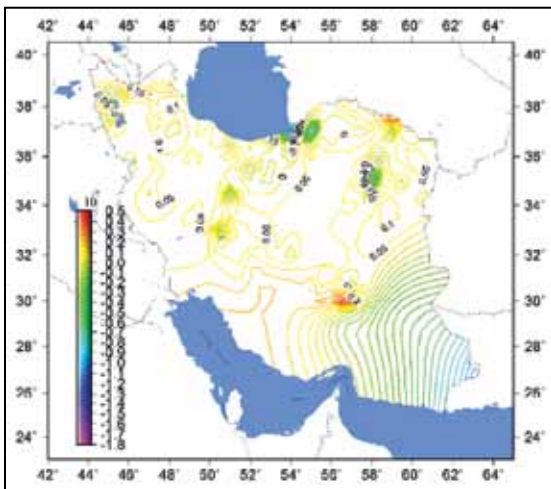
دلیل اصلی استفاده از روش ترازیبی دقیق دو طرفه (به صورت رفت و برگشت)، امکان بررسی خطاهای سامان‌مند در قطعه‌های ۲ تا ۳ کیلومتری و مسیرهای طولانی‌تر و همچنین امکان کنترل و کشف مشاهدات اشتباه است. حال اگر ترازیبی دقیق یک‌طرفه را برای انجام تکرارهای ترازیبی دقیق در نظر بگیریم که هدف آن تعیین تغییرات ارتفاعی در یک منطقه است، با انجام مشاهدات به صورت آلترناتیو یعنی قرائت قطعه‌های فرد به صورت رفت و قطعه‌های زوج به صورت برگشت، یک مواجهه مؤثر اجرایی با خطاهای سیستماتیک مختلف وابسته به جهت مسیر ترازیبی خواهیم داشت. این روش کم و بیش مانند همان روشی است که به صورت قرائت دو طرفه با خطاهای سیستماتیک مواجه می‌شویم و آنها را کاهش می‌دهیم. از سوی دیگر، برای کنترل و کشف مشاهدات اشتباه گزینه‌های مختلفی برای روش ترازیبی دقیق یک‌طرفه برای اهداف ژئودینامیک ارتفاعی وجود دارد. با توجه به این که تغییرات ژئودینامیک ارتفاعی مورد بررسی با روش ترازیبی دقیق به صورت محلی هستند، (مثلاً با ابعاد حدود ۵۰'۵۰ کیلومتر) و با توجه به این که برای بررسی مناسب این پدیده‌ها با ابعاد چند ده کیلومتر به وسیله مشاهدات ترازیبی دقیق، به تراکم مناسبی از مسیرهای ترازیبی دقیق که محدوده مطالعه را به خوبی پوشش دهند نیاز است، در حقیقت ما با لوپ‌های کوچک ترازیبی دقیق در ابعاد چند ده کیلومتر سروکار خواهیم داشت. بنابراین یک روش کنترل مشاهدات اشتباه می‌تواند بر اساس کنترل خطای بست لوپ‌های کوچک ترازیبی دقیق صورت گیرد. روش دوم این است که ۱۰ تا ۲۰ درصد از قطعه‌های ۲ تا ۳ کیلومتری را به صورت اتفاقی و یا قطعه‌های قرائت شده در شرایط نامناسب را به صورت دو طرفه قرائت کرد. روش سوم، به کارگیری مشاهدات مراحل زمانی پیشین است. به هر حال مشاهدات اشتباه غالباً تفاوت‌های آشکاری با تغییرات ژئودینامیکی دارند. بنابراین با مقایسه مشاهدات مربوط به چند مرحله زمانی می‌توان مشاهدات اشتباه را کشف کرد. لازم به یادآوری است که استفاده از روش ترازیبی دقیق یک‌طرفه به صورت آلترناتیو برای اهداف تکرارهای ترازیبی دقیق و ژئودینامیک ارتفاعی در دنیا سابقه دارد (Bossler, 1984; Bomford, 1983; Vanicek, 2005) (Gupta et al., 2003). به عنوان مثال در آمریکا مشاهدات یک‌طرفه ترازیبی دقیق تکراری برای اهداف ژئودینامیک ارتفاعی به صورت آلترناتیو برای رویارویی با خطاهای سیستماتیک اجرایی شده است. برای کنترل اشتباهات بخشی از قطعات ۲ تا ۳ کیلومتری به صورت دو طرفه قرائت شده‌اند اما تأکید بر استفاده از مشاهدات مرحله پیش و ثبت الکترونیکی مشاهدات و نیز مقایسه خودکار مشاهدات مربوط به دو مرحله در هنگام کنترل است. در این حالت برآورد صحت و دقت اندازه‌گیری‌ها می‌تواند به خوبی بر اساس خطاهای بست مربوط به تعداد لوپ‌های زیاد با محیط نسبتاً کوچک انجام گیرد. این روش به صورت هوشیارانه‌ای اقتصادی تعریف شده و به طور توانمند می‌تواند برای ترازیبی تکراری یک کشور با مساحت بزرگ به کار گرفته شود. برای بررسی پدیده‌های با تغییرات ژئودینامیک ارتفاعی در ابعاد بزرگ‌تر، روش منطقی استفاده از روش‌های سریع‌تر، ارزان‌تر و دقیق‌تر مثل GPS است، زیرا دقت ارتفاعی GPS در این حالت از دقت ترازیبی دقیق بالاتر است، به این سبب که خطای اختلاف ارتفاع حاصل از ترازیبی دقیق وابستگی بیشتری به فاصله بین نقاط اندازه‌گیری دارد تا خطای اختلاف ارتفاع حاصل از GPS.



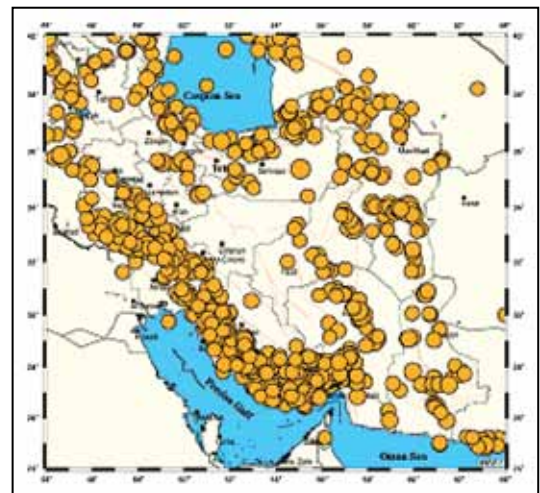
شکل ۲- آرایش گسل‌های فعال در ایران و سازوکار کانونی برخی از زمین‌لرزه‌های مربوط (حسامی، ۱۳۸۲)



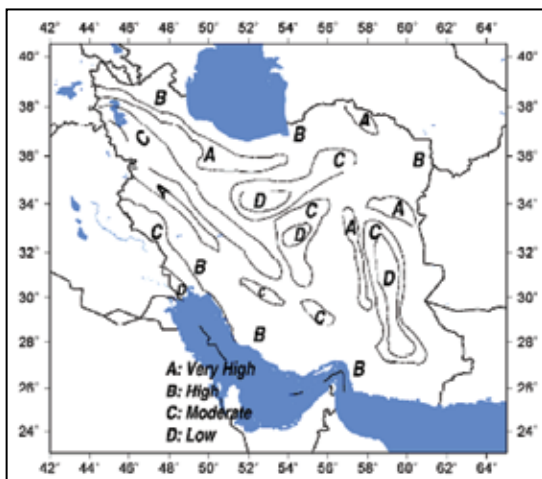
شکل ۱- شبکه‌های ملی ترازبایی دقیق ایران. شبکه درجه ۱ به رنگ سرخ و با طول بیش از ۳۰۰۰۰ کیلومتر، شبکه درجه ۲ به رنگ سبز و شبکه درجه ۳ به رنگ بنفش. طول شبکه‌های درجات ۲ و ۳ در مجموع بیش از ۵۰۰۰۰ کیلومتر است.



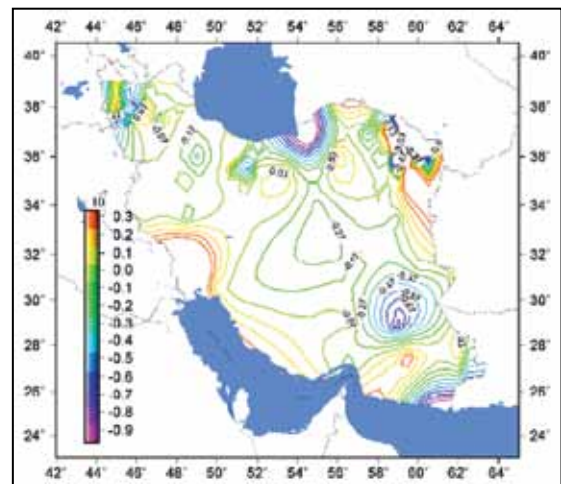
شکل ۴- تغییرات انحنای محاسبه شده از روی مشاهدات دو مرحله ترازبایی دقیق شبکه درجه یک ایران (به m^{-1})



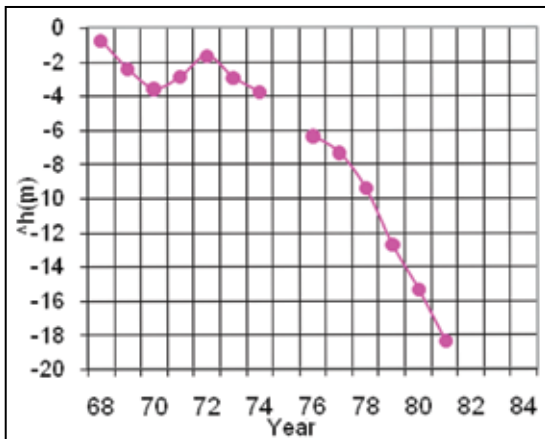
شکل ۳- آرایش زلزله‌های با شدت بزرگ‌تر از ۵ ریشتر در ایران از ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۸ به تعداد ۸۰۹ زلزله (IIEES)



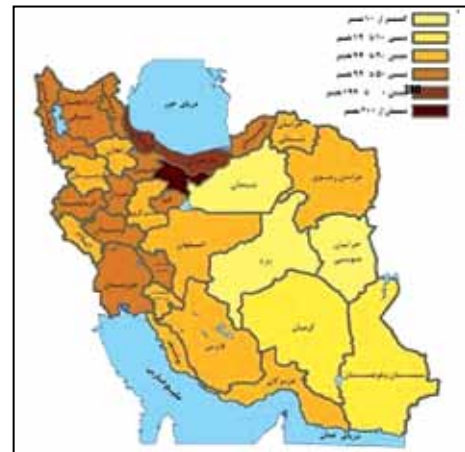
شکل ۶- مناطق مختلف در پهنه‌بندی خطر زلزله در ایران (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴)



شکل ۵- تغییرات انحنای محاسبه شده از روی مشاهدات شبکه ایستگاه‌های دائم GPS ایران (به m^{-1})



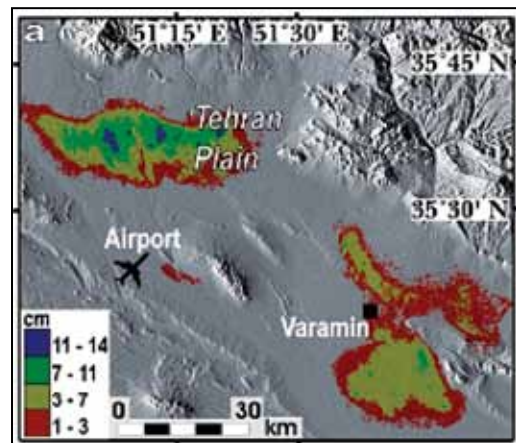
شکل ۸- نمودار میانگین تجمعی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان ورامین (به متر) (<http://www.tw.org.ir/info/mainpage.asp>)



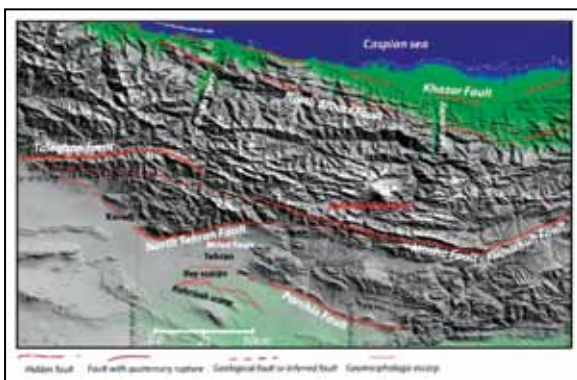
شکل ۷- تراکم نسبی جمعیت به تفکیک استان در سال ۱۳۸۵ (نفر در کیلومتر مربع) (<http://www.sci.org.ir>)



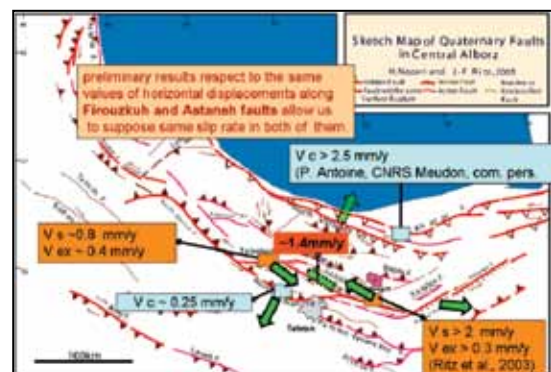
شکل ۱۰- شبکه ایستگاه‌های سنگی چند منظوره فیزیکی ژئودزی و ژئودینامیک ایران (Hatam et al., 2008)



شکل ۹- الگوی فرونشست در ناحیه ورامین و تهران (Motagh et al., 2008)



شکل ۱۲- نمایش گسل‌های فعال در البرز مرکزی (Nazari & Ritz, 2008)



شکل ۱۱- نقشه ساده شده از ویژگی‌های هندسی و سازوکار گسل‌های فعال (کواترنری) در البرز مرکزی (Nazari & Ritz, 2005)، پیکان‌های سبز نشانگر بردار لغزش نسبی هر صفحه گسل در البرز مرکزی است.

کتابنگاری

عربی، س.، مالکی، ا.، کوه زارع، آ.، ایازیان، م.، معینی، ح. و جوادی، م.، ۱۳۸۵- ترازیبی دقیق در ایران، سازمان نقشه برداری کشور.
 حسامی آذر، خ.، ۱۳۸۲- نقشه گسل های فعال ایران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله و مهندسی زلزله.
 مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴- آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰.

References

- Altiner, Y., 1999- Analytical Surface Deformation Theory, Springer.
- Bomford, G., 1983- Geodesy, Oxford University Press, 3Rev Ed.
- Bossler, J. D., 1984- Standards and Specifications for Geodetic Control Networks, Federal Geodetic Control Committee, Maryland.
- Choy, G. L. & Zednik, J., 1997- The Rupture Process of the Manjil, Iran Earthquake of 20 June 1990 and Implications for Intraplate Strike-Slip Earthquakes, Journal of Studia Geophysica et Geodaetica, Volume 41, Number 1 / January, 1997, DOI: 10.1023/A: 1023336723587
- Djamour, Y., 2004- Contribution de la Géodésie (GPS et nivellement) à l'étude de la déformation tectonique et de l'aléa sismique sur la région de Téhéran (montagnes de l'Alborz, Iran), These de doctorat, L'université de Montpellier2, Montpellier, France.
- Djamour, Y., Nankali, H. R., Sedighi, M., Sadeghi, F., Rahimi, Z., Tavakoli, F., Mousavi, Z., Khorrani, F., Aghamohammadi, A. & Hosseini, S., 2007- First results inferred from the new Iranian Permanent GPS Network for Geodynamics (IPGN), Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 04910, 2007, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-04910
- Government of Japan, 2004- Spatial Data Infrastructure Work in Japan. Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.50 March, 2004.
- Gupta, H. K., Niwas, S., Bhaattachayra, A., Naqvi, S. W. A. & Goswami, B. N., 2003- Indian National Report for 23rd General Assembly of IUGG, Sapporo, Japan, pages 9-10.
- Hatam, Y., Djamour, Y., Bayer, R., Vanicek, P., Abolghasem, A. M., Hinderer, J., Mohammad Karim, M., Najafi Alamdari, M., Cheraghi, H., Saadat, R., Soltanpour, A., Sedighi, M., Nankali, H., Arabi, S., Azizian, N. & Rafiey, S., 2008- Designing and Implementation of the Multi-purpose Physical Geodesy and Geodynamics Network of Iran (MPGGNI2005), EGU 2008, Vienna.
<http://www.sci.org.ir>
<http://www.tw.org.ir/info/mainpage.asp>
- IGN, 1987- Nivellement Geometrique Motorisé et Nivellement indirect de precision Motorisé, Institut Geographique Nationale.
- IIEES: The International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, <http://www.iiees.ac.ir>
- Kasser, M., 2008- Maintenance of the NGF (French Levelling Networks) with a GPS assistance. Oral presentation at NCC Geomatics conference.
- Mäkinen, J. & Saaranen, V., 1999- Computation of postglacial land uplift from the three precise levellings in Finland. In: M. Lilje (ed): Geodesy and Surveying in the Future. The Importance of Heights. March 15-17, 1999, Gävle, Sweden. Proceedings, LMV-Rapport 1999:3, 285-288.
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J. & Zschau, J., 2008- land subsidence in Iran caused by widespread water-reservoir overexploitation, Geophys. Res. Lett., 35, 2008.
- Motagh, M., Klotz, J., Tavakoli, F., Djamour, Y., Arabi, S., Wetzel, H.-U. & Zschau, J., 2006- Combination of precise leveling and InSAR data to constrain source parameters of the Mw = 6.5, 26 December 2003 Bam earthquake, Pure and Applied Geophysics, 163, 1, 1-18, 2006.
- Nazari, H. & Ritz, J. F., 2005- Sketch map of Quaternary Faults in Central Alborz. GSI.
- Nazari, H. & Ritz, J. F., 2008- Neotectonic in central Alborz, special issue, Vol 17, No. 1, Geosciences, GSI.
- Vanicek, P. & Krakiwsky, E. J., 1986- Geodesy: the Concepts.
- Vanicek, P. & Nagy, D., 1980- On the Compilation of the Map of Contemporary Vertical Crustal Movements in Canada, Tectonophysics, 70, pp. 75-86.
- Vanicek, P., 2005-8- Personal Communications.
- Vanicek, P., Elliott, M. R. & Castel, R., 1978- Four Dimensional Modeling Of Recent Vertical Movements in the Area of the Southern California Uplift, Tectonophysics, 52, pp. 287-300.